



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA TÁHLOVÝCH HÁKŮ

PRODUCTION OF TOWING HOOK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Frýdl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Pavel Frýdl**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba táhlových háků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Táhlový hák, který se využívá pro spojování železničních vagónů, je zhotovován zápusťkovým kovááním na protiběžném bucharu. S ohledem na značné rozměry a podlouhlý, složitý tvar výkovku, je před vlastním kovááním nezbytné zařadit operaci předkování, kdy dochází k přerozdělení materiálu výchozího tyčového polotovaru podél jeho osy. Pro tuto operaci se využívá podélného válcování na kovacích válcích.

Cíle diplomové práce:

- Popsat původní technologii výroby táhlového háku.
- Zpracovat literární studii věnovanou technologii válcování předkovků.
- Zhodnotit stávající postup válcování předkovku táhlového háku.
- Na základě simulací a ověřovacích zkoušek optimalizovat proces válcování předkovku táhlového háku.
- Navrhnout úpravu výrobní linky s ohledem na požadavek automatizovaného pracoviště.
- Vypracovat výkresovou dokumentaci nástrojů a výrobní linky.
- Provést technicko-ekonomické zhodnocení navrženého řešení.

Seznam literatury:

HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. (2007): Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. (2006): Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

ASM-Metals Handbook: Forming and Forging. (2004): Vol.14. USA ASM International. S.978. ISBN 0-87170-020-4

LIDMILA, Zdeněk. (2008): Teorie a technologie tváření II. Brno: Univerzita obrany, 2008. 106 s. ISBN 978-80-7213-580-2.

NOVOTNÝ, Karel. (1992) Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

FRÝDL Pavel: Výroba táhlových háků

Požadavkem pro vytvoření nového technologického postupu výroby táhlových háků byla úspora nákladů pomocí optimalizace výchozího polotovaru a poloautomatizace pracoviště. Zvolením technologie podélného válcování pro výrobu předkovku dochází ke zkrácení výrobních časů a výrazné úspoře materiálu. Válcováním polotovaru jsou zajištěny vždy přesné rozměry předkovku a pomocí řetězových dopravníků je usnadněna manipulace s materiálem pro pracovníky a snížen výrobní čas kovací linky. Zavedením navrženého způsobu výroby táhlových háků bude při velikosti série 30000 ks/rok dosaženo úspory více než 4 mil. Kč ročně. Návratnost investic na pořízení a úpravu kovacích válců a dopravníků je 2,2 let.

Klíčová slova: válcování, kování, tváření, přetvárný odpor

ABSTRACT

FRÝDL Pavel: Production of towing hook

Requirements for the creation of a new technological process of manufacturing of towing hooks were cost savings by optimizing the initial blank and by creating semi automatic workplace. Selecting longitudinal rolling technology for manufacturing preform piece occurs to shorten production times and substantial material savings. By rolling of blank are secured always the exact dimensions of the preform piece and through a chain conveyors is facilitated handling with material for workers and reduced production time of forging line. By introduction of the proposed manufacturing method of towing hooks depending on the size of the series 30000 hooks per year will be achieved annually savings of over 4.000.000 CZK. Return of investments for the acquisition and adjustment of forging rolls and conveyors is 2,2 years.

Keywords: rolling, forging, forming, deformation resistance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRÝDL, Pavel. *Výroba táhlových háků*. Brno, 2016. 57 s, 3 výkresy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27.5.2016

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc. za cenné rady a připomínky ke zpracování diplomové práce.

Dále děkuji firmě MSV Metal Studénka, a. s. za poskytnutí zázemí při zpracování diplomové práce. Jmenovitě Ing. Pavlu Feilhauerovi a Ing. Robertu Köllerovi za poskytnutí podkladů a poznámek k tématu diplomové práce a panu Miloši Friedlovi za dlouhodobou odbornou spolupráci.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

ÚVOD	9
1 TÁHLOVÝ HÁK	10
1.1 Táhlové háky vyráběné v MSV Metal Studénka, a.s.	12
2 PŮVODNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY	13
2.1 Důvody optimalizace výrobního postupu	14
2.2 Návrh nové technologie výroby předkovku	14
3 TEORIE VÁLCOVÁNÍ	15
3.1 Podélné válcování	16
3.2 Rozložení napětí a silové podmínky při válcování	19
3.3 Válcování v kalibrech	22
3.4 Válcovací tratě a stolice	24
3.5 Pracovní válce	26
3.6 Vady materiálů, výroba předválek a parametry válcování	27
4 ZAVEDENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE	29
5 NÁVRH CELKOVÉHO ŘEŠENÍ	30
6 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ	31
7 ZÁVĚRY	32

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam výkresů

ÚVOD [14]

Válcování za tepla je velmi významnou technologií výroby hutních výrobků a polotovarů, například pro zápustkové kování. Nejpoužívanější metodou při přípravě polotovarů pro zápustkové kování je příčné klínové válcování, které je vhodné pro rotační předkovky ve tvaru osazených hřídelí. Podélné válcování (obr. 1) se používá pro výrobky rotačních i nerotačních tvarů, kde je požadováno například zploštění výrobku či předkovku pro ustavení v kovací dutině a podobně. Tyto technologie se vyznačují vysokou produktivitou a hospodárností. V hutním odvětví jsou široce využívány a proto je zde snaha o ekonomické úspory zejména snižováním energetické náročnosti, spotřeby výchozího materiálu a zvyšováním životnosti nástrojů.



Obr. 1 Příklad podélného válcování předkovku háku [14]

1 TÁHLOVÝ HÁK [10], [14]

Výroba táhlových háků je velmi obsáhlá problematika, sdružující množství výrobních technologií a postupů. Vzhledem ke složitosti tvaru háku, jeho hmotnosti a roční produkci je celý proces ekonomicky náročný. Navržením hospodárnějšího využití materiálu a použitím nových technologií by mělo dojít k výrazné úspoře výrobních nákladů.

Táhlový hák (obr. 2) je zápusťkový výkovek charakteristického tvaru o délce téměř 800 mm a hmotnosti 33 kg. Tvoří důležitý prvek spřahovacího ústrojí kolejových vozidel, které společně s narážecím ústrojím zajišťuje přenos podélných tahových a tlakových sil mezi jednotlivými vozy kolejových souprav.



Obr. 2 Táhlový hák [14]

Hlavní částí táhlového háku je hlava (obr. 3) sloužící pro zavěšení šroubovky ze sousedního vozu soupravy. Tvar hlavy háku je maximálně přizpůsoben namáhání od tahových sil. Rozměry jsou přesně definovány podle normy Mezinárodní železniční unie. V hlavě háku je otvor pro čep k připojení šroubovky. Dále přechází tvar háku v dřík obdélníkového průřezu sloužící k vedení háku v průchodu podvozkem vozu. Na konci se nachází oko háku, které slouží k připojení háku k vypružovacímu zařízení a podvozku vozidla.



Obr. 3 Části táhlového háku [14]

Kompletní táhlové ústrojí lze provést jako průběžné nebo neprůběžné. U průběžného táhlového ústrojí jsou spřahovací elementy na obou koncích vozidla vzájemně spojeny táhlem. Tento způsob nezatěžuje skříň vozu tahovými silami a je tak vhodný i pro vagóny lehčí konstrukce. Nevýhodou jsou však vyšší nároky na pohon, protože při rozjezdu se souprava chová jako tuhý celek. Táhlové háky jsou zde místo oka zakončeny T hlavou pro spojení s táhlem pod podvozkem vozu. V současnosti se od této konstrukce spíše upouští.

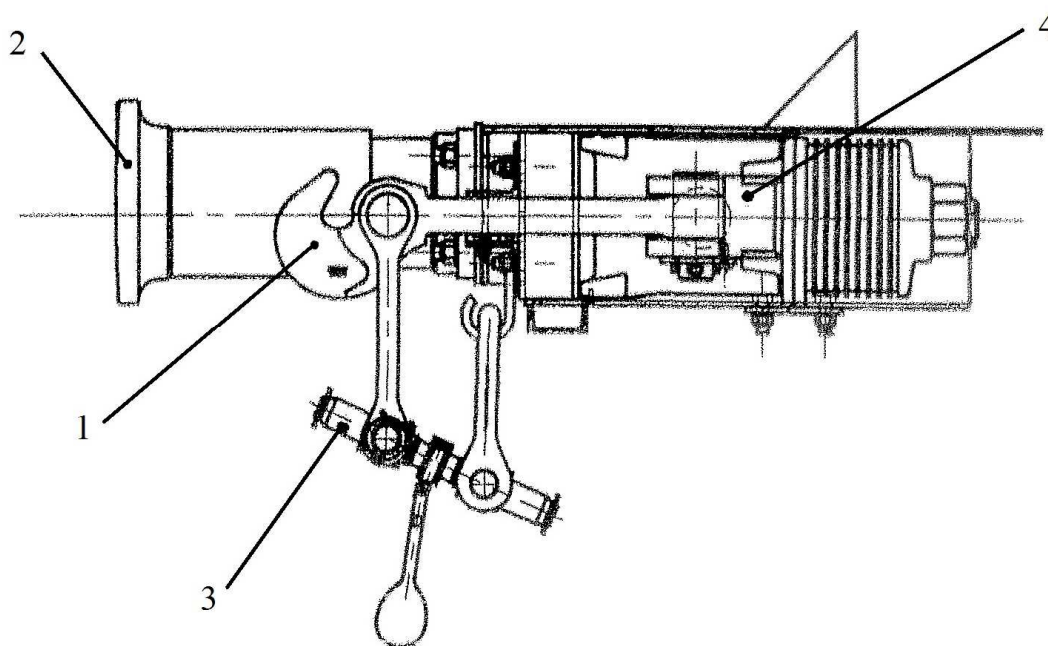
U neprůběžného táhlového ústrojí se síly přenáší od jednoho konce vozidla ke druhému skrze konstrukci podvozku, která proto musí být dostatečně pevná. Jedná se o častěji používaný způsob pro běžnou osobní i nákladní železniční dopravu. Hlavní části tohoto ústrojí tvoří, kromě řešeného táhlového háku, také šroubovka a vypružovací systém, který minimalizuje silové rázy vznikající během provozu vlakové soupravy.

Šroubovka (obr. 4) je sestava několika dílů sloužících k vlastnímu spojení vozidel. Závěsnice, výkovky ve tvaru ojnic, jsou záměrně konstruovány jako prvky s nejnižší pevností celého táhlového ústrojí. Důvodem je nejsnadnější vyměnitelnost těchto součástí. Při provozu se vždy používá pouze jedna ze dvou sestav šroubovek. V případě přetržení lze vozy spojit šroubovkou na čele druhého vozu.



Obr. 4 Šroubovka [14]

Obrázek 5. zobrazuje zjednodušenou sestavu spřahovacího ústrojí. Ve stavu nepřipojeném k dalšímu vozu je šroubovka odložena v závěsu na čele podvozku.



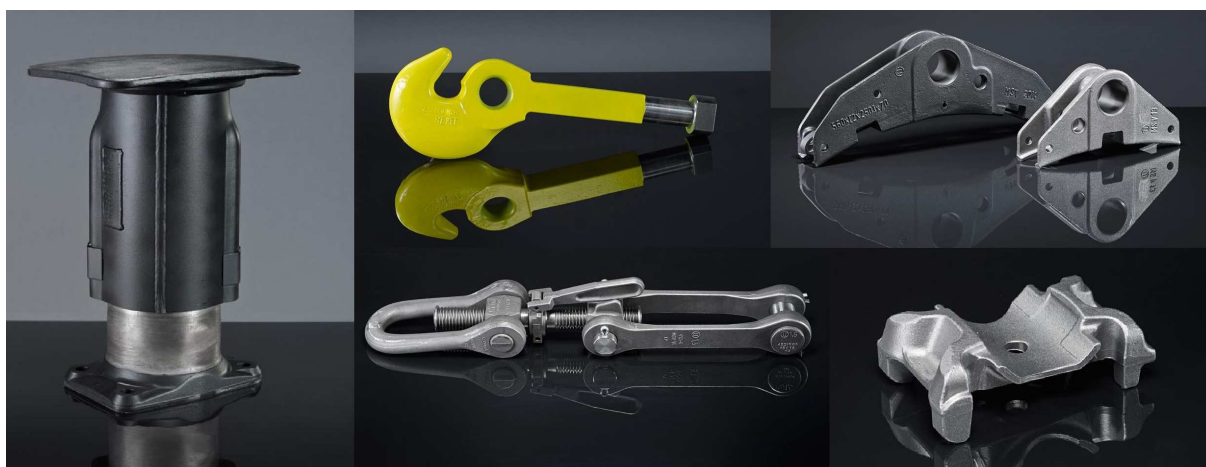
1 – táhlový hák; 2 – nárazník; 3 – šroubovka; 4 - vypružení
Obr. 5 Zjednodušené spojovací ústrojí kolejových vozidel [14]

Výroba táhlových háků a jejich rozměry musí odpovídat normám Mezinárodní železniční unie. Konkrétní parametry různých typů háků se mohou lišit v závislosti na použití pro nákladní či osobní vagony nebo lokomotivy. Dále také dle místa použití; například pro severské státy, kde je požadavek na odolnost materiálu proti stárnutí při snížených teplotách až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Všechny výrobky táhlových háků podléhají přísným interním i externím kontrolám.

1.1 Táhlové háky vyráběné v MSV Metal Studénka, a.s. [2], [14]

Kompletní proces výroby táhlových háků je zajišťován společností MSV Metal Studénka, a.s., která se řadí mezi přední evropské výrobce zápustkových výkovků zejména pro kolejová vozidla i jiná odvětví. Je přímým pokračovatelem bývalé Vagonky Studénka, založené v roce 1901. Strojní vybavení firmy umožňuje komplexní výrobu výkovků a komponentů pro kolejová vozidla od vývoje a prvotního návrhu až po kompletaci železničních podsestav.

Mezi nejdůležitější výrobky patří zápustkové výkovky z oceli o hmotnosti od 0,5 kg do 76 kg, do průměru 450 mm a délky 900 mm. Významnou oblast tvoří vývoj a výroba spojovacích a nárazecích ústrojí. Jedná se zejména o nárazníky pro nákladní a osobní kolejová vozidla a lokomotivy. Dále také několik druhů šroubovek lišících se dovoleným zatížením dle oblasti použití. Příklady výrobků společnosti MSV Metal Studénka, a.s. jsou uvedeny na obr. 6.



Obr. 6 Příklady výrobků společnosti MSV Metal Studénka, a.s. [14]

Táhlové háky tvoří rovněž součást spojovacího ústrojí kolejových vozidel. Jejich výroba podléhá požadavkům evropských norem a norem Mezinárodní železniční unie. Práce pojednává o dvou hlavních typech vyráběných háků, které se liší dovoleným zatížením a jakostí materiálu.

- ♦ **Táhlový hák 1500 kN**

- ♦ **Táhlový hák 1000 kN**

Chemické složení oceli a mechanické parametry táhlových háků podléhají utajení, proto tato část kapitoly nemohla být zveřejněna.

2 PŮVODNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY [5], [11], [14]

Technologický postup výroby táhlových háků podléhá utajení, proto tato kapitola nemohla být zveřejněna v plném rozsahu.

2.1 Důvody optimalizace výrobního postupu [14]

Volným kováním není zaručen vždy přesný a stejný tvar předkovků. Dochází k tomu vlivem náročnosti ruční manipulace s polotovarem při jeho ustavování na kovádle bucharu. Na předkovku tak vznikají povrchové nerovnosti, které při následném kování přecházejí v přeložky, jež se nedají vybroušením odstranit.

S technologií volného předkování souvisí také takt výrobní linky. Obtížnou manipulací s materiálem se prodlužuje výrobní čas potřebný na jeden kus táhlového háku. Zároveň je nutno pracovat s objemnějším polotovarem, aby byla alespoň částečně snížena zmetkovitost při výrobě.

Hlavní cíle pro zavedení nové technologie předkování táhlového háku:

- ♦ Úspora materiálu
- ♦ Přesnější kování
- ♦ Menší procento výroby neshodných kusů
- ♦ Snížení počtu pracovníků
- ♦ Snížení fyzické námahy pracovníků

2.2 Návrh nové technologie výroby předkovku [14]

Požadavkem na návrh nové technologie bylo zefektivnění výroby při splnění všech hlavních cílů (viz kap. 2.1). Prvotním návrhem byla pouze změna polotovaru pro ruční předkování z kulatiny na sochor o průřezu 120×120 mm, která ovšem nevedla k výrazné změně ve stavu předkovků.

Jednoduchou nabízející se možností výroby předkovků háků bylo příčné klínové válcování. Firma disponuje válcovacím strojem pro tuto technologii do průměru vývalků 70 mm. Zvažoval se tedy možný nákup válcovacího stroje pro větší průměry vývalků, tak aby odpovídaly rozměrům požadovaným pro předkovky háků. Nakreslen byl model předvalku odpovídající technologii příčného klínového válcování. Pro účely zkoušek byly podle modelu vytvořeny předkovky pomocí ručního kování a později i pomocí frézování a soustružení. Tyto předkovky byly použity pro zkoušky kování na stávajícím bucharu. Výkovky neodpovídaly požadavkům zejména z důvodu složitého tvaru táhlového háku. Oko háku je proti hlavě pootočeno o úhel 90° a nejobjemnější část hlavy je přesazena mimo osu háku. Oproti tomu předvalek z plánované technologie příčného klínového válcování má osově symetrický rotační tvar, který nedokáže přesně vyplnit kovací dutinu bez nepřípustných defektů typu záložek nebo nedostatečného vyplnění dutiny zápustky.

Z předchozího plyne nutnost výroby předkovku ve tvaru bližším tvaru původního ručního předkovku, který je vyhovující z hlediska rozměrů, pouze nezajišťuje vždy potřebnou přesnost. Zároveň platí požadavky na úsporu materiálu a snížení fyzické námahy pracovníků. Z těchto důvodů vyplynula jako nejvhodnější technologie podélného válcování.

V následující kapitole je uvedeno rozdělení technologií válcování dle několika hledisek a vypracován teoretický rozbor podélného válcování. V kap. 4 je uveden postup zavádění této technologie do výroby a popis současného průběžného stavu výroby táhlových háků. Dále práce pokračuje návrhem optimalizace a poloautomatizace výroby, spojeným s ekonomickým zhodnocením optimalizace.

3 TEORIE VÁLCOVÁNÍ [1], [5], [6], [8], [9], [13], [15], [16], [17], [20]

Válcování je proces objemového tváření kovů, může být prováděn za tepla i za studena. Válcovaný materiál je plynule tvářen mezi dvěma nebo více rotujícími válci. Při tom vzniká ve tvářeném materiálu trojosá napjatost. Při válcování platí zákon zachování konstantního objemu materiálu.

$$h \cdot b \cdot l = konst \quad (3.1)$$

kde	h je tloušťka materiálu	[mm]
	b je šířka materiálu	[mm]
	l je délka materiálu	[mm]

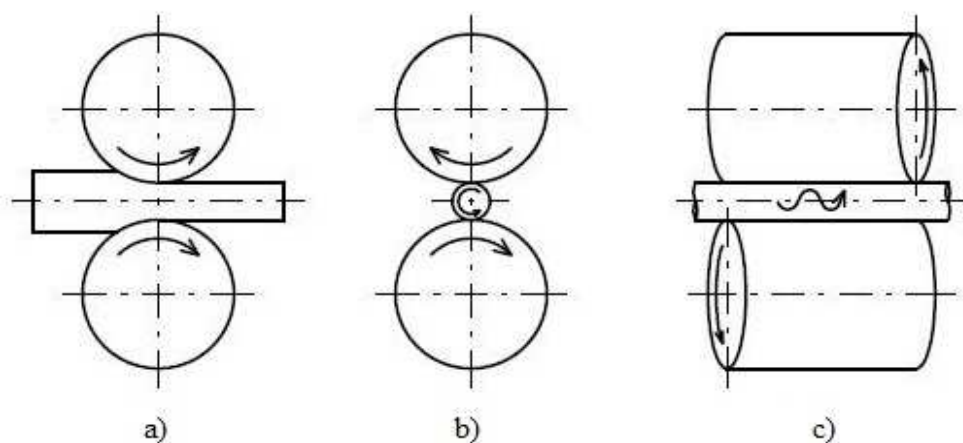
K největší deformaci dochází ve směru tloušťky materiálu h , menší deformace nastává ve směru délky l a šířky b tvářeného materiálu.

Z hlediska tvářecí teploty můžeme technologii válcování rozdělit na válcování za studena a za tepla.

- ♦ **Válcování za studena** – probíhá ze teploty nižší než je rekrytalizační teplota. Rekrytalizace probíhá v určitém pásmu teplot, proto je hraniční teplota stanovena jako $0,3 T_i$ (T_i je teplota tavení materiálu). Při válcování dochází ke zpevnění materiálu a vzniku vnitřního napětí. Se zvyšováním pevnosti se snižuje plasticita kovu, proto je nutno při více průchodech válcí zařadit mezioperaci žíhání.
- ♦ **Válcování za tepla** – nastává při teplotách vyšších než rekrytalizační teplota. Během plastické deformace za těchto teplot se krystalová mřížka kovu rychle obnovuje. Proto se téměř nemění mechanické vlastnosti materiálu a zachovává se krystalická struktura kovu.

Podle směru průchodu materiálu, průběhu deformace a dle vzájemné polohy pracovních válců a vývalku dělíme válcování na:

- ♦ **Podélné** (obr. 20a) – osy pracovních válců jsou rovnoběžné a kolmé na směr rychlosti pohybu tvářeného polotovaru. Válcovaný materiál je vtahován mezi válce, které se otáčejí proti sobě.
- ♦ **Příčné** (obr. 20b) – osy válců jsou rovnoběžné s osou válcovaného materiálu. Válce mají shodný smysl otáčení a materiál se točí v opačném směru mezi nimi. Tím dochází k jeho tváření a změně průřezu. Tento způsob se používá pro hromadnou výrobu rotačních součástí, například hřídelí nebo pro válcování závitů.
- ♦ **Kosé** (obr. 20c) – podobně jako u příčného válcování je provalek umístěn mezi dva shodně se otáčející válce, jejichž osy jsou však mimoběžné. Poloha os vede k rozložení obvodové síly válců do dvou složek. Jedna z nich působí ve směru obvodu provalku a umožňuje jeho rotaci. Druhá složka působí v osové směru, díky čemuž se provalek posunuje skrze válcovací mezeru. Používá se například pro válcování trubek, kde vnitřní průměr je kalibrován pevným trnem.



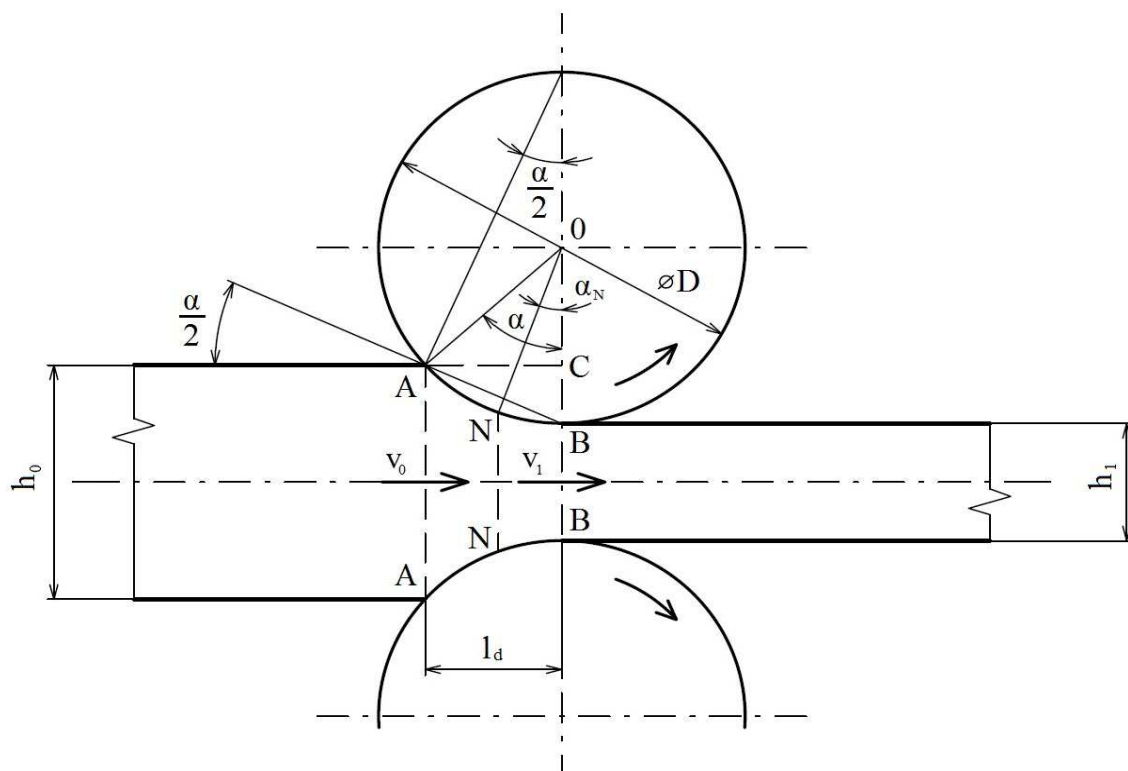
a) podélné, b) příčné, c) kosé válcování

Obr. 20 Princip válcování [12]

Vzhledem k řešenému problému bude v následujících kapitolách rozebrána detailněji technologie podélného válcování za tepla.

3.1 Podélné válcování [1], [6], [13], [16], [17], [20]

K deformaci materiálu dochází v pásmu deformace (obr. 21, oblast mezi body A-A-B-B). Tvářený materiál má na počátku tloušťku h_0 a šířku b_0 a po průchodu válci tloušťku h_1 a šířku b_1 . Rozdíl mezi hodnotami h_0 a h_1 nazýváme úběr. Poměrná část obvodu pracovního válce, která v daném okamžiku působí na materiál je vymezena úhlem záběru, kóta α .



Obr. 21 Schéma podélného válcování [17]

Při průchodu provalku pásmem deformace uzavřeném válcovací mezerou, kóta h_l , dochází k plastické deformaci provalku. Materiál vstupuje do pásma deformace rychlostí v_0 a vystupuje rychlostí v_l . Obvodová rychlost pracovních válců v_{obv} je konstantní a platí $v_0 < v_{obv} < v_l$. Z důvodu tohoto gradientu rychlosti rozlišujeme v pásmu deformace nejprve pásmo zpoždování a potom pásmo předstihu oddělené neutrálním bodem N. V tomto bodě dochází k vyrovnání obvodové rychlosti válce a rychlosti tečení materiálu. V pásmu zpoždování a v pásmu předstihu dochází ke smýkání mezi válcem a tvářeným materiálem, které se vzájemně liší průběhem deformace a napětí. Plocha pracovního válce, která je v kontaktu s provalkem je cyklicky smykově namáhána.

Polohu neutrální roviny udává rovnice:

$$\alpha_n = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \mu} \right) \quad (3.2)$$

kde: α_n je úhel polohy neutrální roviny $[\circ]$

α je úhel záběru $[\circ]$

μ je součinitel vnějšího tření $[-]$

Uvedená závislost platí za podmínky:

$$\mu < 0,4$$

$$\alpha < 20^\circ$$

$$l_d / h_s > 3$$

kde: l_d je délka geometrického pásma deformace $[\text{mm}]$

h_s je výška geometrického pásma deformace $[\text{mm}]$

Kromě geometrických parametrů pásma deformace má nejvýraznější vliv na polohu neutrální roviny součinitel vnějšího tření. S rostoucí hodnotou μ se zvětšuje úhel α_n a blíží se úhlu $\alpha/2$.

Průběh deformace při válcování a příslušné schéma napětí má průběh podobný jako při pěchování. Odlišuje se vlivem kinematických činitelů, které při válcování působí zejména na okrajové části pásma deformace.

♦ Tření při válcování

Schopnost válců vtáhnout tvářený materiál do válcovací mezery je dána zejména součinitelem tření mezi provalkem a nástrojem. Hodnota součinitele tření závisí na stykových plochách válců (mechanické vlastnosti oceli, drsnost povrchu) a na podmínkách kontaktu s tvářeným materiálem (struktura a chemické složení oceli, rychlost, teplota a měrný tlak při válcování, případně přítomnost maziva). Při procesu je nutno rozlišovat typ prokluzu v pásmu deformace, hodnota součinitele tření je tedy proměnlivá. Jedná se o součinitel tření při záběru materiálu válci μ_z , při prokluzu μ_{pr} a při ustáleném pohybu μ_u . Součinitel tření μ_z lze určit dle mezního úhlu záběru:

$$\mu_z = \operatorname{tg} \alpha_{\max} \quad (3.3)$$

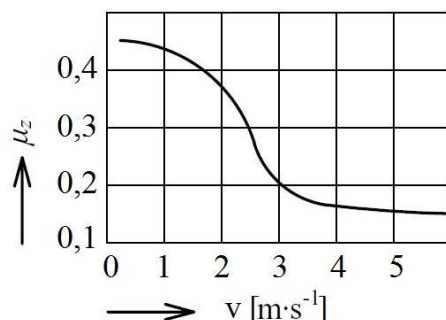
kde μ_z je součinitel tření při záběru materiálu válci

α_{\max} je mezní úhel záběru

Při válcování za tepla dosahuje μ_z hodnot $0,212 \div 0,268$ pro hladké leštěné válce a hodnot $0,445 \div 0,446$ pro kalibrované nástroje. Se zvyšující se rychlostí válcování součinitel tření klesá. Při prokluzu a ustáleném válcování je součinitel tření menší než při záběru. Pro příklad válcování oceli 11 370 je poměr μ_z/μ_{pr} v rozmezí $1,25 \div 2$. Použití maziva má výrazný vliv na velikost součinitele tření při prokluzu po celé délce styčné plochy μ_{pr} a nepatrně ovlivňuje také součinitel tření při záběru μ_z .

Závislost součinitele tření na teplotě má pro teploty $800 \div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ přibližně lineární mírně klesající charakter. Vliv na hodnotu součinitele tření má také chemické složení materiálu. Čím nižší je tvářecí teplota, tím výrazněji klesá hodnota součinitele tření s rostoucím obsahem uhlíku v oceli. Za teplot $1000 \div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází ke snížení součinitele tření vlivem výskytu okujů, které zastávají funkci maziva. Zvýšením drsnosti povrchu pracovních válců, například rýhováním, je možno významně zvýšit hodnotu součinitele tření.

Vliv obvodové rychlosti válců na součinitel tření udává obr. 22. Závislost platí pro nízkouhlíkové oceli a pro teplotu přibližně $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po překonání určité mezní hodnoty (asi $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) dochází k výraznému poklesu součinitele tření. Při rychlostech nad $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je hodnota součinitele tření opět téměř konstantní.



Obr. 22 Závislost součinitele tření na obvodové rychlosti válců [20]

♦ Šíření při válcování

Přírůstek šířky provalku po jeho průchodu válcovací mezerou nazýváme šíření. Je způsobeno příčným tokem kovu a lze jej vyjádřit pomocí rovnice:

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (3.4)$$

kde Δb je šíření při válcování [mm]
 b_0 je původní šířka provalku [mm]
 b_1 je konečná šířka provalku [mm]

Volné šíření nastává mezi hladkými válci nebo v otevřených kalibrech, jejichž šířka je větší než konečná šířka provalku. Šíření omezené vzniká v případě, kdy materiál naráží na stěny kalibru a jeho konečná šířka je rovna šířce dutiny nástroje. Nucené šíření probíhá ve tvarových kalibrech, kde hodnota úběru není po celém průřezu provalku konstantní.

Šíření je možno považovat za vítaný nebo nepříznivý jev z hlediska dosažení požadovaného tvaru provalku. Volné šíření má vždy za následek snížení tvařitelnosti, protože způsobuje vznik tahových napětí. Největší nebezpečí tyto napětí představují pro lité oceli při válcování na hladkých válcích. Vliv na přednostní směr toku kovu (podélný nebo příčný) má zákon nejmenšího odporu.

Na velikost šíření má vliv výchozí šířka kovu, rozměry pásma deformace, tvar příčného průřezu pásma deformace a poloměr pracovního válce. Dále pak chemické složení materiálu a jeho mechanické vlastnosti, součinitel tření, teplota a rychlost válcování. Působení všech geometrických a fyzikálních faktorů má vliv na stav napjatosti ve vývalku. Šíření je tím větší, čím většími hodnotami úběrů se celkového přetvoření dosáhlo. Neboli při shodné změně výšky provalku bude šíření větší při válcování jedním průchodem než při válcování postupně několika průchody válců.

Se zvětšující se šířkou provalku dochází ke zvyšování šíření do určité mezní hodnoty a poté naopak k poklesu. Velké šířky provalku způsobují zvyšování tření v příčném směru, takže menší odpor proti pohybu materiálu nastává v podélném směru.

Šíření lze omezit nebo naopak zvýšit vhodným tvarem pásma deformace (kalibru). Uzavřené kalibry jsou vhodné pro válcování oceli s nižší tvařitelností. V závislosti na chemickém složení oceli dochází k největšímu šíření u homogenní feritické oceli.

S rostoucím průměrem válců se výrazně zvyšuje šíření. Je to dáno narůstajícím třením v podélném směru, což je způsobeno zvětšujícím se záběrovým obloukem. Menší odpor k tečení materiálu tak nastává ve směru příčném. Materiál ohřátý na nižší teplotu má větší deformační odpor a proto se více zaplní kalibr ve směru výšky. Do následujícího kalibru tak vstupuje více materiálu než při válcování teplejšího materiálu. To způsobí, že při nižší teplotě ohřevu vykazuje výsledný provalek větší šíření. Vliv válcovací rychlosti na velikost šíření je proměnlivý. Při nižších rychlostech do $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ šíření roste a dosahuje maxima. Mezi rychlostmi $2 \div 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se snižuje a při rychlostech vyšších je téměř konstantní.

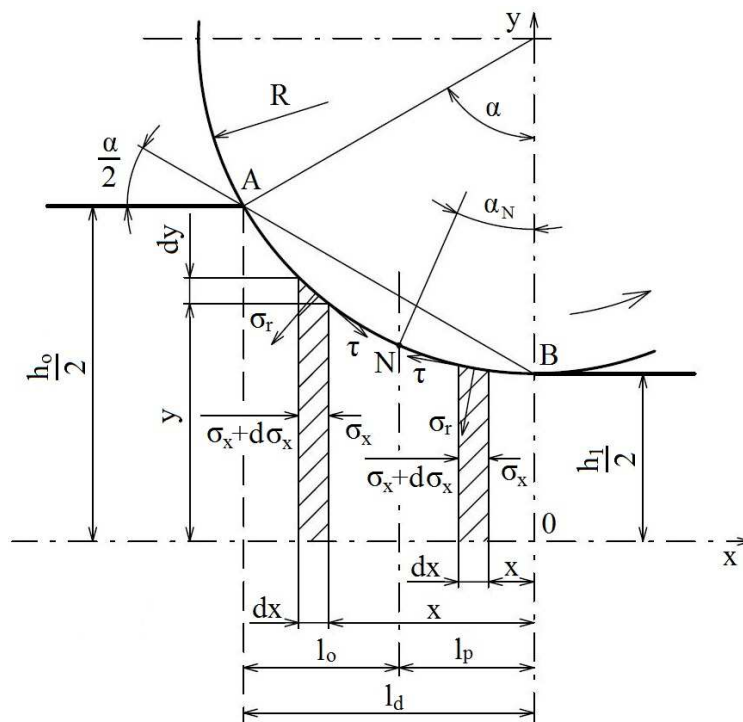
3.2 Rozložení napětí a silové podmínky při válcování [8], [17], [20]

Během procesu válcování jsou nástroje mechanicky zatěžovány v důsledku cyklického působení tlakových sil. Analytický rozbor měrného tlaku na ploše válce v kontaktu s materiálem je značně složitý a je možný pouze při zavedení určitých zjednodušujících podmínek. Metoda výpočtu uvedená v literatuře [17] vychází z diferenciálních rovnic napětíové rovnováhy. Řešení se odvozuje pro příklad hladkých válců za předpokladu dvojsového stavu napjatosti v pásmu deformace. Velikost napětí závisí zejména na geometrických parametrech, tření na stykové ploše a změnách teploty provalku během válcování.

Rozbor napětí v řezech pásmem deformace je uveden na obr. 23. V neutrálním bodě se mění směr tečného napětí, diferenciální rovnici rovnováhy je možno zapsat ve tvaru:

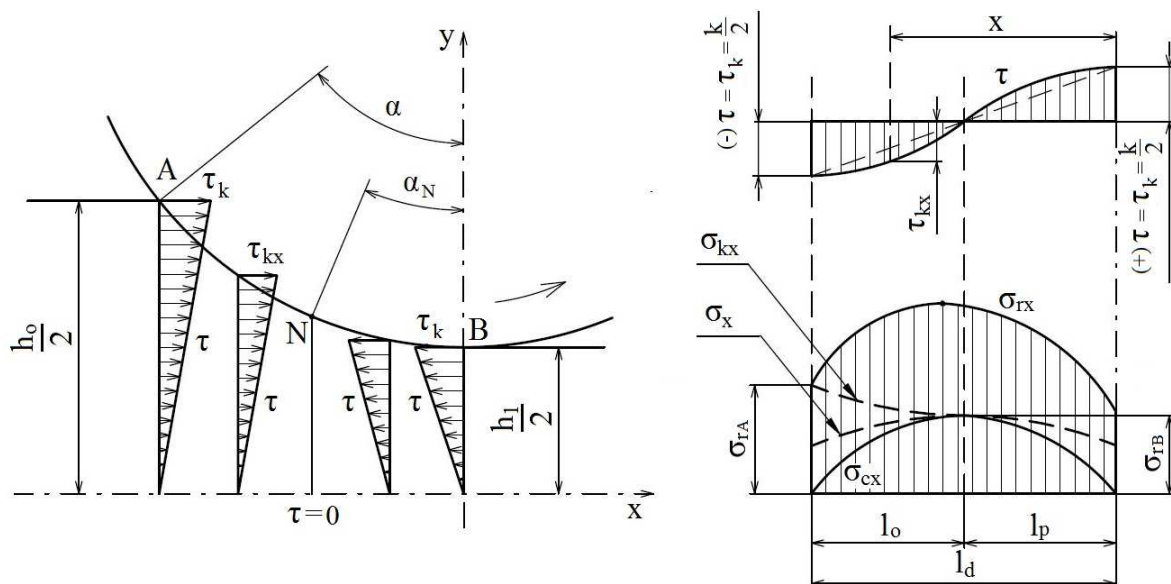
$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{\sigma_r - \sigma_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau}{y} = 0 \quad (3.5)$$

K řešení této rovnice je nutno znát vztah mezi σ_r a σ_x a rozdělení napětí v délce pásma deformace.



Obr. 23 Napětí v pásmu deformace [17]

Průběhy napětí po záběrném oblouku jsou znázorněny na obr. 24. Podrobný rozbor a odvození závislostí napětí na geometrických faktorech je uvedeno např. v literatuře [17] a [20].



Obr. 24 Průběhy napětí po záběrném oblouku [17]

Silové podmínky při válcování jsou dány válcovací silou a válcovacím momentem, který je částí celkového kroutícího momentu zatěžujícího válcovací stolici. Hodnoty těchto veličin závisí na technologii válcování, míře opotřebení válcovacího stroje apod. a mění se v jednotlivých stádiích procesu. Pro zjednodušení se však předpokládá konstantní velikost silových podmínek a uvažuje se válcování bez působení vnější tahové nebo tlakové síly na provalet.

♦ Válcovací síla

Přítlačná síla ve svislém směru mezi provaletem a pracovními válci se nazývá válcovací síla. Pro možnost rychlého výpočtu je vyjadřována vztahem

$$F_V = \sigma_{ps} \cdot Q_{FV} \cdot S \quad [\text{N}] \quad (3.6)$$

kde F_V je válcovací síla [N]
 σ_{ps} je střední přirozený deformační odpor válcovaného kovu za daných termomechanických podmínek [MPa]
 Q_{FV} je střední tvářecí faktor pro určení síly [-]
 S je styková plocha [mm²]

Střední přirozený deformační odpor σ_{ps} závisí na teplotě materiálu ϑ , středním stupni deformace ε_s a střední rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}_s$. Pokud materiál vstupuje do válcovací mezery bez předchozího zpevnění, pak platí

$$\sigma_{ps} = f(\vartheta; \varepsilon_s; \dot{\varepsilon}_s) \quad [\text{MPa}] \quad (3.7)$$

Střední tvářecí faktor Q_{FV} závisí na poměrech l_d/h_s a b_0/h_0 a také na středním součiniteli tření μ_{vs} a stupni deformace ε_1 . Pro jednotlivé válcovací stolice se zavádí předpoklad, že tvářecí faktor Q_{FV} je závislý pouze na poměru l_d/h_s a stupni deformace ε_1 .

Styková plocha S je vyjádřena vztahem

$$S = b_s \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.8)$$

$$\text{kde } b_s = (b_0 + b_1) / 2$$

b_0 je max. šířka provalku při vstupu do válcovací mezery [mm]

b_1 je max. šířka provalku při výstupu z válcovací mezery [mm]

R je poloměr válce [mm]

Δh je absolutní úběr za průchod [mm]

♦ Válcovací moment

Válcovací moment M_{kv} je součástí celkového kroutícího momentu M_{kp} , který působí na válcovací stolici. Celkový moment se rozděluje na moment dynamický M_{kdyn} a moment statický M_{kstat} .

$$M_{kp} = M_{kdyn} + M_{kstat} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3.9)$$

kde M_{kp} je celkový kroutící moment [N·mm]

M_{kdyn} je dynamický moment [N·mm]

M_{kstat} je statický moment [N·mm]

Dynamický moment M_{kdyn} je moment nutný ke změně rychlosti rotující hmoty pohonu stroje. Statický moment M_{kstat} se dále skládá ze tří složek podle vztahu

$$M_{kstat} = M_{kv} + M_{kt} + M_{kch} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3.10)$$

kde M_{kstat} je statický moment [N·mm]

M_{kv} je válcovací moment [N·mm]

M_{kt} je třecí moment [N·mm]

M_{kch} je moment chodu naprázdno [N·mm]

Výše zmíněný válcovací moment M_{kv} působí jako hlavní složka, umožňující posuv tvářeného materiálu mezi pracovními válci. Jeho velikost závisí zejména na deformačním odporu materiálu provalku. Výpočet lze provést dle vztahu

$$M_{kv} = \sigma_{ps} \cdot Q_M \cdot S \cdot R \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3.11)$$

kde σ_{ps} je střední přirozený deformační odpor materiálu [MPa]

Q_M je střední tvářecí faktor pro určení momentu [-]

S je styková plocha [mm²]

R je poloměr válce [mm]

Vypočtená hodnota válcovacího momentu odpovídá jednomu pracovnímu válci. Za předpokladu symetrického působení momentů se celkový válcovací moment stanoví dle vztahu

$$M_{kvC} = 2 \cdot M_{kv} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3.12)$$

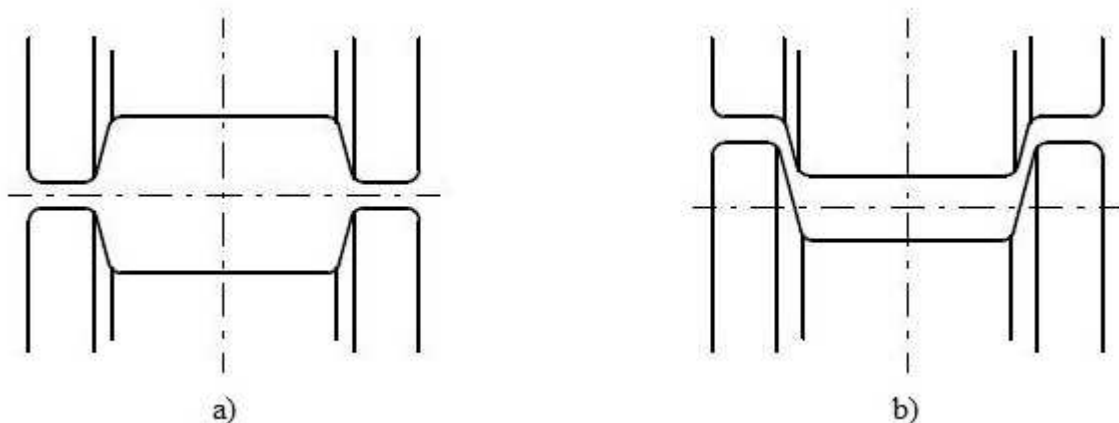
kde M_{kvC} je celkový válcovací moment [N·mm]

M_{kv} je válcovací moment [N·mm]

3.3 Válcování v kalibrech [9], [13], [15], [20]

Požadavkem na technologii válcování v kalibrech je získání provalku požadovaného průřezu s přesnými rozměry, při současné snaze o vysokou produktivitu a nízkou výrobní cenu. Řešení závisí zejména na vhodné volbě úběru v jednotlivých průchodech a optimálním využití teploty válcovaného materiálu. Správná velikost úběru zabezpečuje dobré vyplnění dutiny kalibrů bez nadměrného opotřebení válců. Nadměrné opotřebení kalibrů pro poslední průchody negativně ovlivňuje přesnost tvaru a rozměrů vývalku. Nedostatečná teplota polotovaru pro válcování se projeví zvýšenými nároky na sílu stroje a může vést k zastavení procesu válcování. Mezi další důležité činitele patří délka vývalku, rychlost válcování a rozložení úběrů do jednotlivých operací. Z důvodu vyšší teploty a tedy nižšího přetvárného odporu kovu se největší úběry volí zpravidla pro počáteční průchody válců.

Kalibr je tvořen dvojicí zářezů v tělech pracovních válců. Nevyužité části těla válců, mezi jednotlivými kalibry, se nazývají příruby. Kalibry mohou být otevřené (obr. 25a), kdy zářez na jednom z válců je umístěn naproti zářezu na druhém válci, a uzavřené (obr. 25b), kdy výstupek na jednom válci zasahuje částečně do zářezu na druhém z válců. Podle úhlu sevřeného mezi směrem mezery a osou válcování je možno rozlišit o jaký kalibr se jedná. Pro úhel větší než 60° je kalibr uzavřený, pro úhel menší než 60° jde o kalibr otevřený.



a) otevřený, b) uzavřený kalibr

Obr. 25 Typy kalibrů [20]

Předválcovací kalibry se zhotovují ve tvaru čtverce případně obdélníku (skříňové kalibry) s osami symetrie shodnými s osami kalibru. Používají se u předválcových tratí. Mezi přípravné patří také kosočtvercové kalibry a tzv. gotické ve tvaru kosočtverce s oblými stranami. Jako předhotovni se označují kalibry ve tvaru čtverce, jehož úhlopříčky jsou ve směru os kalibru. Dále pak kalibry oválové, kruhové a další, které tvoří přechodný tvar mezi polotovarem a hotovým vývalkem. Při konstrukci kalibru pro přesné vývalky je nutno postupovat s ohledem na smrštění oceli během chladnutí. Pro vývalky do průměru $D = 10$ mm má kalibr tvar kružnice s přírůbkem $1,01 D$ až $1,013 D$. Pro větší průměry se vyrábějí kalibry oválové s vodorovnou osou delší než svislou. Pěchovací kalibr je speciální typ, ve kterém se po nepříznivém šíření v předchozích operacích pěchují ploché provalky na požadovanou šířku.

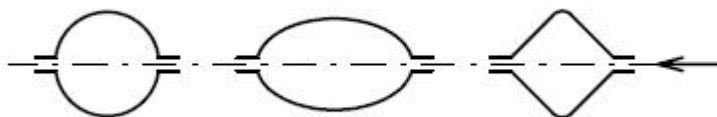
Kalibry jsou vždy konstruovány s úkosem ($3 \div 25^\circ$), které zabraňují zaklínování provalku. Poloměr zaoblení hran kalibrů slouží k zamezení tvorby výronků. Tvar a rozmístění zářezů mají podstatný vliv na životnost válců. Je vhodné hlubší dutiny umísťovat na okraj válců a mělké zářezy do středu, tak aby se snížilo ohybové namáhání válců.

♦ **Kalibrační řady pro předvalky čtvercového průřezu**

Předválcovací kalibry musí být navrženy s ohledem na přesné vedení provalku ve stanovené poloze. Soustava skříňových kalibrů se používá pro válcování velkých průřezů až do minimálního rozměru 50×50 mm. Výhodou je malé zeslabování válců, proto se používá pro válcování ingotů a také v prvních průchodech na těžkých až středních válcovacích tratích. Soustava kosočtvercových kalibrů se využívá při válcování průřezů 50×50 až 150×150 mm. S výhodou je používána pro válcování legovaných ocelí vyžadujících menší úběry a také při požadavku na čtvercové vývalky s ostrými hranami. Nevýhodou je obtížnější ustavení a vedení provalku po jeho hraně.

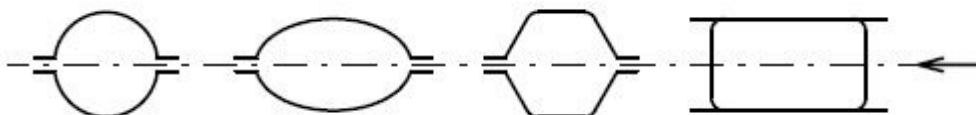
♦ **Kalibrační řady pro předvalky kruhového průřezu**

Válcování tyčí kruhového průřezu v rozsahu průměru $5 \div 300$ mm probíhá na válcovacích tratích s různými průměry válců. První varianta navazuje na přípravný kalibr tvaru čtverce. Z vývalku tohoto tvaru přejde materiál přes předhotovný oválný do hotovného kruhového kalibru (obr. 26). Tento způsob se používá obvykle pro oceli průměru $5 \div 20$ mm.



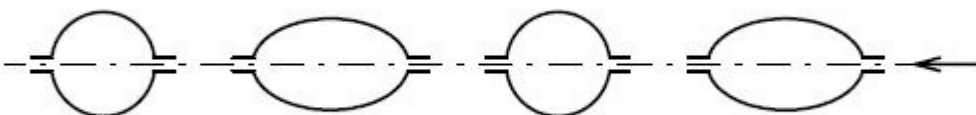
Obr. 26 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru 5 až 20 mm [20]

Druhá metoda vychází z obdélníkového předvalku a materiál prochází kalibry ve tvaru šestiúhelník – ovál – kruh (obr. 27). Používá se pro oceli průměru $20 \div 100$ mm. Výhodou je rovnoměrná deformace v přechovacím šestiúhelníkovém a oválném kalibru.



Obr. 27 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru 20 až 100 mm [20]

U třetího způsobu válcování se střídají kalibry tvaru oválu a kruhu (obr. 28). Dochází ke srovnání velikosti deformace v předhotovném a hotovném kalibru a k lepšímu vedení provalku v dutině bez použití zaváděčů. Tato metoda je používána pro válcování největších průměrů (až 300 mm).



Obr. 28 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru až 300 mm [20]

3.4 Válcovací tratě a stolice [6], [13], [15], [20]

Zařízení pro válcování plechů, drátů, dlouhých profilů a tyčí různých průřezů se nazývá válcovací trať. Jedná se o výrobní linku zahrnující různý počet strojů a manipulačních částí, které jsou potřebné pro zhotovení požadovaných vývalků. Součástí tratě bývá obvykle i ohřívací pec, případně také zařízení pro kalibraci a povrchovou úpravu provalků.

Tratě je možno rozdělit podle velikosti a uspořádání. Nejjednodušší příklad je trať s jednou stolicí doplněná dopravníkem apod., které slouží jako univerzální pro různé druhy použití. Velmi vhodným typem pro výrobu dlouhých tyčových a tvarových provalků jsou průběžné tratě. Válcovací stolice jsou umístěny v řadě za sebou a dovolují tak rychlý, nepřetržitý výrobní proces. Mezery mezi stolicemi tvoří dopravníky, po kterých se přesunuje polotovary. Válcování tak probíhá vždy pouze v jednom zařízení. Oproti tomu u spojitých tratí se vývalek válcuje v několika strojích současně, protože jsou umístěny těsně za sebou, bez dopravníků. Používají se často při válcování drátů a také pro sochory a tyčové vývalky menších až středních rozměrů.

Pracovní válce jsou umístěny ve stojanu tvořícím základ válcovací stolice. Dle směru otáčení válců rozlišujeme jednosměrné stolice, kde dochází k prostojům při případném přemísťování materiálu z koncového stavu zpět před válcovací stolicí. Zpravidla se však používají při výrobě drátů a pásů plechu na dlouhých tratích. Oproti tomu zpětné stolice mohou otočit smysl otáčení nástrojů. Vývalek je tvářen při průchodu mezi válci oběma směry. Tento způsob se uplatňuje při válcování těžkých tyčových polotovarů a plechů o velké tloušťce.

Podle konstrukce a počtu válců mohou být válcovací stolice dvou až mnoho-válcové, univerzální nebo speciální. Poloha válců ve stolicích může být vodorovná, svislá nebo šikmá. Nejjednodušší a nejrozšířenější jsou dvouválcové stolice, které mají dva válce s osami vodorovně uložené nad sebou. Poháněný může být pouze jeden z válců a druhý se otáčí díky působení tření při vstupu materiálu do válcovací mezery. Obvykle však motor pohání oba válce.

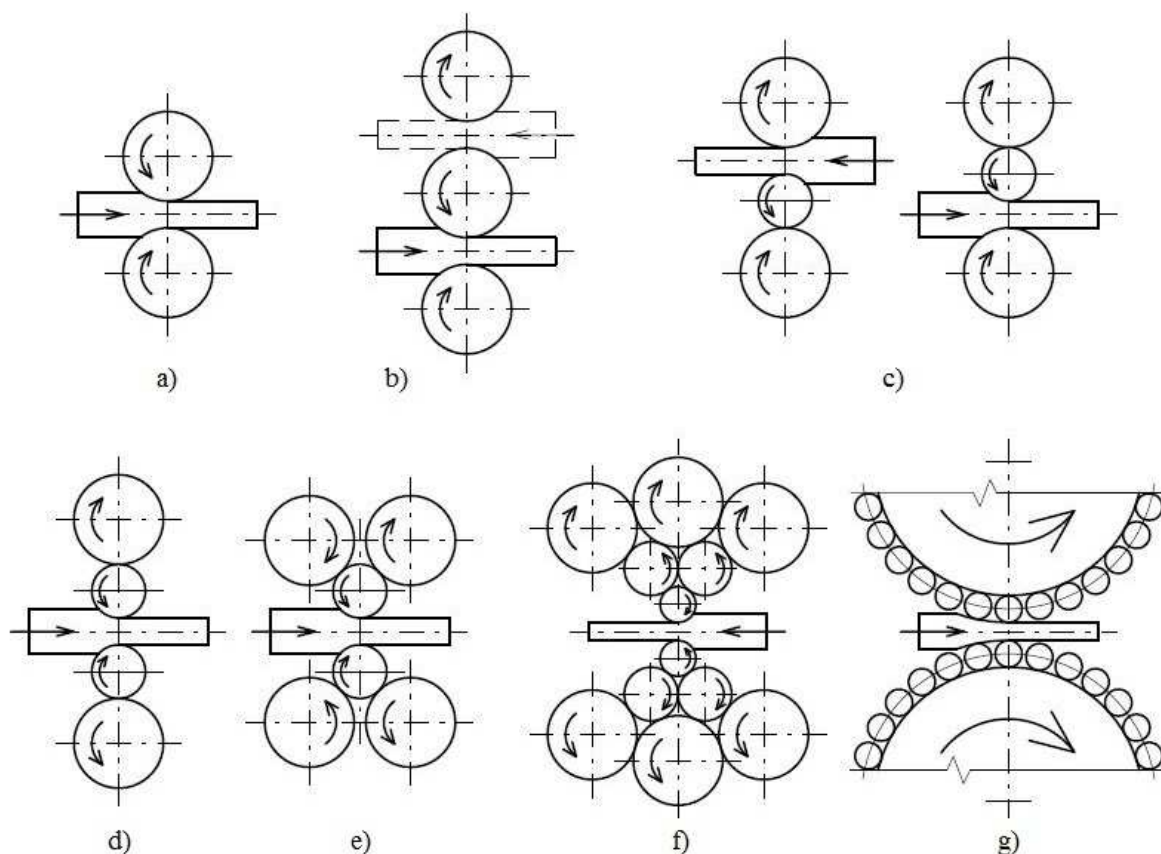
Tříválcové stolice jsou vybaveny třemi vodorovnými válci nad sebou. Poháněný je prostřední válec, který má pevné uložení a další dva válce jsou poháněny skrze převod a je možno nastavit jejich polohu. Směr otáčení válců se zde nemění, neboť tato stolice umožňuje pracovat ve dvou rovinách. Speciální druh je tzv. Lauthovo trio, kde prostřední válec je přibližně o třetinu menší než zbývající dva válce. Je stavitelný a pohon je přenášen na dva větší válce, které jsou uloženy pevně. Díky menšímu průměru středního válce lze dosáhnout většího prodloužení materiálu. To je vhodné například pro válcování plechů, avšak použití čtyřválcových stolic je pro tento účel ještě výhodnější.

Válcovací stolice se čtyřmi vodorovnými válci uloženými nad sebou je používána pro aplikace s většími silovými nároky. Konstrukční uspořádání je obdobné jako u předchozích typů. Menší průměr vnitřní dvojice válců vede k přesnější tloušťce a většímu prodloužení vývalku. Vnější opěrné válce mají větší průměr a umožňují válcování s vyššími měrnými tlaky. Výhodou je omezení průhybu pracovních válců a tedy zajištění přesného průřezu provalku. Obvykle jsou poháněny menší pracovní válce a zařízení může být provedeno jako jednosměrné i zpětné.

Při větším počtu válců se stolice označují jako mnohoválcové. Jedná se o sestavu několika vodorovných válců umístěných v různých rovinách. Vnitřní pracovní válce jsou většinou poháněné, s výjimkou nástrojů malého průměru do 50 mm. Konstrukce s větším počtem opěrných válců umožňuje za studena válcovat plechy a fólie velmi malých tloušťek. Je to dáno nižší stykovou plochou mezi nástrojem a materiálem a tuhou konstrukcí zařízení.

Planetové stolice jsou tvořeny dvojicí opěrných vodorovných válců velkého průměru a dvěma soustavami malých pracovních válců, které je obíhají. Výhodou je možnost až 95% úběru materiálu při jednom průchodu. Jejich použití je zejména při válcování plechů za tepla. Stolice které mají kromě vodorovně umístěných válců také válce ve svislé poloze se nazývají univerzální. Jsou vhodné pro pravoúhlé průřezy provalků, kde je požadavek na přesné rozměry a ostré hrany materiálu. Dalším druhem mohou být speciální stolice, které mají šikmé uložení válců a slouží například k výrobě bezešvých trubek.

Základní druhy válcovacích stolic dle rozmístění válců jsou uvedeny na obr. 29.



a) dvouválcová stolice, b) tříválcová stolice, c) Lauthovo trio,
d) čtyřválcová stolice, e) šestiválcová stolice, f) dvanáctiválcová stolice, g) planetová stolice

Obr. 29 Základní druhy válcovacích stolic [20]

Také je možno válcovací stolice rozdělit dle velikosti vývalku, kdy se jedná o stolice jemné, střední, hrubé a těžké, pro největší rozměry polotovárů. Dále pak podle tvaru provalku, pro který jsou učené, např. sochorové, pro válcování plechu, trubek, drátů apod.

Rám válcovacích stolic tvoří stojany, které odvádějí síly vznikající při kontaktu materiálu s nástroji. Dle tvaru rozeznáváme stojany uzavřené a otevřené. Výhodou uzavřené konstrukce je její vyšší tuhost, což umožňuje dosažení větší přesnosti válcování.

Sestava zařízení sloužících k zabezpečení správné polohy tvářeného polotovaru vůči pracovním válcům se souhrnně nazývá armatura válcovací stolice. Dělí se podle místa použití na vběhovou, výběhovou a převáděcí. Vběhová armatura zajišťuje přesné navedení polotovaru do kalibru pomocí různých vodících součástí. Nejjednodušší způsob je pomocí vodítek, které jsou tvořeny dvěma deskami, vymezujícími prostor pro pohyb materiálu.

Ve velkosériové výrobě je možno využít vodící stůl. Jedná se o jednoúčelový tvarový odlitek s otevřenými dutinami ve tvaru průřezů válcovaných polotovarů. Pro nejsložitější tvary provalků se používá vodící skříň, která je přidrží ze všech stran a dosahuje tak největší přesnosti vedení.

Na opačné straně válcovací stolice se nachází výběhová armatura, sloužící pro správné vysunutí vývalku z pracovního prostoru. Kromě obdoby výše popsaných vodítek a stolů jsou používány také stěrače. Uplatňují se zejména u menších průřezů materiálu a zabraňují jeho navinutí na vále po průchodu válcovací mezerou. Z důvodu zrychlení výrobního procesu mohou být používány také tzv. převaděče. Slouží k přesunutí vybíhajícího konce vývalku do vedlejší stolice nebo do dalšího kalibru téže stolice.

K dopravě materiálu mezi navazujícími stroji se využívají obvykle válečkové dopravníky. Příčný pohyb po dopravnících nutný k přesunu provalků mezi jednotlivými kalibry je zajišťován pomocí manipulátorů. Závěrečné operace výroby vývalků zahrnují jejich dělení na požadovanou délku. K tomu se využívá technologie stříhání, nebo řezání pro větší průřezy materiálu. Obě metody je možno použít při nepřerušovaném chodu linky, což má pozitivní vliv na efektivitu výroby. Pokud jsou vývalky v závěru procesu prohnuté, zařazuje se operace rovnání. Nejčastěji se používá válečková rovnačka, kde materiál prochází soustavou stavitelných válců a dochází k rovnání střídavým ohybem.

3.5 Pracovní válce [6], [15], [17], [20]

Pro technologii válcování je potřeba nejméně dvou pracovních válců, mezi kterými dochází ke tváření materiálu. Tyto nástroje pracují za vysokých měrných tlaků a proto je nutno dbát zvýšené pozornosti při návrhu jejich tvaru, rozměrů a materiálových charakteristik.

- ♦ **Konstrukce pracovních válců**

Pracovní válce mohou být ploché, k výrobě rovinných polotovarů (plechů, pásů), nebo tvarové (tzv. kalibry) k výrobě tvarových součástí. Válcovací nástroje jsou nejčastěji vyráběny s rozdílnými mechanickými vlastnostmi v jádře a na povrchu. Z důvodu vysokého mechanického a teplotního namáhání povrchu nástrojů je požadována vysoká tvrdost, teplotní stálost a otěruvzdornost povrchové vrstvy. Jádro nástrojů musí vykazovat dostatečnou houževnatost a pevnost. Z ekonomického hlediska jsou proto válce zpravidla vyráběny jako bimetallické, kdy vnější tvarová vrstva je připevněna na vnitřní tělo válce vyrobeného z materiálu o jiných mechanických vlastnostech.

- ♦ **Výroba pracovních válců**

Tvar nástrojů zpravidla nebývá příliš složitý, ovšem z důvodu vysokých požadavků na přesnost, tuhost a stálost tvarových částí je výrobní postup poměrně náročný. Nejčastěji se tvarové vrstvy válců odlévají pomocí odstředivého lití. Jádro nástroje bývá odléváno gravitačně.

- ♦ **Materiály pracovních válců**

Nejčastěji jsou voleny ušlechtilé oceli s vyšším obsahem Cr (Mo, W, V), z důvodu vysokého teplotního namáhání tvarového povrchu válců. Povrchová vrstva nástrojů může být dále chemicko-tepelně upravována. Materiály jsou zpravidla voleny podle umístění konkrétního válce na válcovací trati. V první části trati je vhodné použít materiály s vysokým obsahem Cr a Mo. Jsou odolné proti popouštění, což je výhodné, neboť provalky mají na počátku trati vysokou teplotu. Prostřední skupiny válců mohou být z důvodu delší životnosti vyráběny z rychlořezné oceli. V poslední části válcovacích tratí se používají povrchově kalené ušlechtilé oceli nebo litiny, kvůli vysokému působení tření díky vyšší válcovací rychlosti.

♦ **Opotřebení pracovních válců**

Tvarové části nástrojů se opotřebovávají vlivem vysokých tlaků a teplot při procesu válcování. Dochází k cyklickému mechanickému a teplotnímu zatěžování, což má za následek vznik napětí v povrchové vrstvě. Může docházet k adhezi, což je nalepování tvářeného materiálu, nejčastěji ve formě okují apod. Při opotřebení otěrem se porušený povrch přebíruje, případně je možno navařit novou vrstvu materiálu. To může být komplikované, například pokud mají být na bocích tvarových kalibrů umístěny drážky pro lepší zachycení tvářeného materiálu a podobně. Při velkém opotřebení je nutno vyměnit celou vnější pracovní část válce.

3.6 Vady materiálů, výroba předvalků a parametry válcování [5], [9], [13], [20]

♦ **Vady výchozích materiálů**

Do procesu válcování vstupuje materiál zpravidla v podobě odlévaných ingotů nebo plynule litých předlitků. Tyto polotovary mohou obsahovat určité množství defektů, které negativně ovlivňují přesnost a hospodárnost výroby. Nejčastějšími vadami jsou různé typy trhlin vznikajících za tepla. Na jejich výskyt má vliv rychlost odlévání a následně smršťování. Mezi vnitřní vady patří např. staženiny, které jsou způsobeny rozdílným objemem taveniny a tuhého kovu. Při tuhnutí oceli se mohou vylučovat oxidy uhlíku, dusík, a vodík, které při setrvání v materiálu vedou ke vzniku pórů a bublin. Dalším typem vad jsou vměstky, které se do oceli dostávají např. stažením nečistot z hladiny taveniny při odlévání nebo z koroze licího zařízení. Při tvářecím procesu se pak vměstky usměrňují dle převládajícího směru deformace a vytvářejí řádkovitost, což vede k anizotropii mechanických vlastností materiálu.

Všechny tyto vady je potřeba zohlednit již v přípravné fázi válcování a případně zařadit technologické operace pro zajištění vhodných materiálových charakteristik. Pomocí homogenizačního žhání lze snížit strukturní nestejnorodost materiálu. Účinnost závisí zejména na teplotě a době ohřevu. Optimální teplota homogenizačního žhání leží nad teplotou rekrytalizace, ale je menší než teplota kritického růstu zrn.

Pokud se na povrchu polotovaru vyskytují vady, je nutno všechny před tvářením odstranit, neboť v nich při válcování dochází ke koncentraci napětí. Mechanické obrábění se používá při vadách po celém povrchu materiálu, protože při broušení a frézování dochází k uběru materiálu po velké ploše. Pro místní vady je vhodné použít pneumatické vysekávání. Nejčastěji se však používá technologie strojního nebo ručního opalování. Jedná se o ohřev oceli na teplotu přibližně 1300 °C a řízené hoření materiálu pomocí proudu kyslíku. Tento způsob lze použít i pro legované oceli.

♦ **Vady válcované oceli**

Zejména při válcování tvarových vývalků, kde je požadován přesný tvar průřezu provalku, se mohou vyskytovat defekty typu výronků. To je způsobeno nepřesným vedením polotovaru nebo pomalým přesunem mezi jednotlivými kalibry. Pokud teplota materiálu vlivem manipulace příliš poklesne, začne být polotovar obtížněji tvařitelný a dochází k většímu šíření. Vzniknou-li šíření na stranách provalku výronky, jsou v dalších průchodech následujícími dutinami zaválcovány do materiálu a vytváří nespojitosti ve struktuře materiálu. Jestliže je naopak teplota tváření vysoká, nedostatečně se zaplní hotovný kalibr a výsledkem mohou být profily s deformovaným tvarem průřezu. Defektům válcovaných výrobků lze předcházet důsledným seřízením válcovacích tratí a zajištěním správné teploty a dalších provozních podmínek.

♦ Výroba předvalků

Výrobky sloužící jako vstupní materiál pro další operace válcování se nazývají předvalky. Podle tvaru a velikosti se rozdělují na:

- bloky – přibližně čtvercového průřezu do poměru stran 1:1,4 a šířce 140 ÷ 360 mm
- sochory – čtvercového průřezu s délkou strany 60 ÷ 130 mm,
- bramy – obdélníkového průřezu o šířce 400 ÷ 1500 mm a výšce 110 ÷ 350 mm,
- ploštiny – obdélníkového průřezu o šířce 180 ÷ 350 mm a výšce 6 ÷ 30 mm,
- kruhové předvalky – sochory kruhového průřezu o průměru až 320 mm

Uvedené příklady rozměrů platí pro oceli třídy 11. Velké předvalky mohou být vyráběny také technologií kontinuálního odlévání. Polotovary určené k dalšímu použití ve válcovnách lze dělit na požadovanou délku stříháním nebo přesněji řezáním na kotoučových či pásových pilách.

♦ Optimalizace výroby na předvalkové trati

Při návrhu procesu válcování je nutno přihlížet k záběrovým schopnostem válců a zohlednit jmenovitou sílu a výkon stroje. Také je potřeba co nejefektivněji využít vstupní materiál a předejít tak možným ekonomickým ztrátám. Pro stanovení optimální hloubky protváření kovu, u které je zajištěna požadovaná kvalita předvalků, se používají vzorce různých autorů. Z literatury byl vybrán jako nejpoužívanější vztah podle T. M. Golubeva:

$$h_{pl} = 50 \cdot \left(\frac{\Delta h}{2} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{l_d}{v_c} \right)^{0,2} \quad [\text{mm}] \quad (3.13)$$

kde	h_{pl} je hloubka protváření kovu	[mm]
	Δh je absolutní úběr za průchod	[mm]
	l_d je délka geometrického pásma deformace	[mm]
	v_c je střední rychlost válcování	[m·s ⁻¹]

♦ Technicko-ekonomické parametry válcování

Z hlediska hospodárnosti výroby patří mezi základní ukazatele spotřeba materiálu, spotřeba energií, životnost nástrojů, atd. Materiálové ztráty jsou způsobeny především opalem při ohřevu, oddělovanými zbytky polotovarů a případnými nekvalitními výrobky. Spotřeba elektrické energie je dána zejména rozměry předvalku a tedy potřebnou velikostí válcovací stolice a tratě. Závisí také na mechanických vlastnostech a teplotě materiálu.

4 ZAVEDENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE [4], [14], [19]

Proces zavedení technologie válcování do výroby táhlových háků podléhá utajení, proto tato kapitola nemohla být zveřejněna.

5 NÁVRH CELKOVÉHO ŘEŠENÍ [7], [18]

Návrh celkového řešení výroby táhlových háků podléhá utajení, proto tato kapitola nemohla být zveřejněna.

6 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky návrhu optimalizace výroby táhlových háků podléhají utajení, proto tato kapitola nemohla být zveřejněna.

7 ZÁVĚRY

Závěry podléhají utajení, proto nemohly být zveřejněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [3]

1. ASM, Metals Handbook. *Forming and Forging*. Vol. 14. USA: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-020-4.
2. BOLZANO. *Přehled vlastností oceli 42CrMo4* [online]. 2014 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf
3. Citace PRO [online]. 2012 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>
4. ČERMÁK, Jan. Předkovací operace v zápustkovém kování - kovací válce a PKV. *Kovárenství*. 2016, (56), 5 stran.
5. DILLINGER, Josef a kolektiv. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
6. ELFMARK, Jiří, a kolektiv. *Tváření kovů*. 1. Praha: SNTL, 1992. Technický průvodce, 62. ISBN 80-03-00651-1.
7. ExactCut: *Kotoučové pily* [online]. 2015 [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://www.exactcut.cz/pila-exactcut-205/>
8. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
9. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: Mechanics and Metallurgy*. 3th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88121-0.
10. IZER, Jiří, Jaroslav JANDA, Zdeněk MARUNA a Stanislav ZRŮBEK. *Kolejové vozy*. Bratislava: ALFA, 1985. ISBN 63-870-84.
11. JKZ Bučovice a. s. *Nástrojová ocel 19663* [online]. 2010 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://jkz.cz/produkty/nastrojova-ocel-12714>
12. LENFELD, Petr. *Technologie objemového tváření: Válcování* [online]. 2010 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm
13. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7213-580-2.
14. MSV Metal Studénka, a.s. [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://msvmetal.eu/>
15. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
16. PEŠINA, E. *Základy užité teorie plasticity*. 1. vyd. Praha: SNTL/SVTL, 1966. Řada teoretické literatury. ISBN 04-016-66.
17. POČTA, B. *Základy teorie tváření kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. Teoretická knižnice inženýra. ISBN 04-417-66.
18. *Stäubli Robotics: TX200 6-axis heavy payload robot* [online]. 2016 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://www.staubli.com/cz/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/heavy-payload-robot/6-axis-industrial-robot-tx200/>
19. Šmeral Brno, a.s. [online]. 2015 [cit. 2015-10-26]. Dostupné z: <http://www.smeral.cz/DefaultCZ.html>
20. ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 520 s. ISBN 04-408-88.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
b	šířka materiálu	[mm]
b_0	původní šířka materiálu	[mm]
b_1	konečná šířka materiálu	[mm]
b_s	střední šířka provalku	[mm]
D	průměr polotovaru	[mm]
D_0	původní průměr polotovaru	[mm]
D_1	navržený průměr polotovaru	[mm]
F_v	válcovací síla	[N]
h	tloušťka materiálu	[mm]
h_0	původní tloušťka materiálu	[mm]
h_1	konečná tloušťka materiálu	[mm]
h_{pl}	hloubka protváření kovu	[mm]
h_s	výška geometrického pásma deformace	[mm]
k	konstanta plastičnosti	[-]
l	délka materiálu	[mm]
L_0	původní délka polotovaru	[mm]
L_1	navržená délka polotovaru	[mm]
l_d	délka geometrického pásma deformace	[mm]
l_o	délka pásma zpoždování	[mm]
l_p	délka pásma předstihu	[mm]
m_0	původní hmotnost polotovaru	[kg]
m_1	navržená hmotnost polotovaru	[kg]
M_{kdyn}	dynamický moment	[N·mm]
M_{kch}	moment chodu naprázdno	[N·mm]
M_{kp}	celkový kroutící moment	[N·mm]
M_{kstat}	statický moment	[N·mm]
M_{kt}	třecí moment	[N·mm]
M_{kv}	válcovací moment	[N·mm]
M_{kvC}	celkový válcovací moment	[N·mm]
Q_{Fv}	střední tvářecí faktor pro určení síly	[-]
Q_M	střední tvářecí faktor pro určení momentu	[-]
R	poloměr válce	[mm]
S	styková plocha	[mm ²]
T_t	teplota tavení materiálu	[°C]
v	rychlost válcování	[m·s ⁻¹]
v_0	vstupní rychlost	[m·s ⁻¹]
v_1	výstupní rychlost	[m·s ⁻¹]
v_c	střední rychlost válcování	[m·s ⁻¹]
v_{obv}	obvodová rychlost	[m·s ⁻¹]

Označení	Legenda	Jednotka
α	úhel záběru	[°]
α_{\max}	mezní úhel záběru	[°]
α_N	úhel polohy neutrální roviny	[°]
Δb	šíření při válcování	[mm]
Δm	úbytek hmotnosti polotovaru	[kg]
Δh	absolutní úběr za průchod	[mm]
ε_l	stupeň deformace	[-]
ε_s	střední stupeň deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}_s$	střední rychlost deformace	[-]
ϑ	teplota materiálu	[°C]
μ	součinitel vnějšího tření	[-]
μ_{pr}	součinitel tření při prokluzu	[-]
μ_u	součinitel tření při ustáleném pohybu	[-]
μ_{vs}	střední součinitel tření	[-]
μ_z	součinitel tření při záběru materiálu válci	[-]
ρ	hustota materiálu	[kg·m ⁻³]
σ_{cx}	napětí v ose x libovolného svislého průřezu	[MPa]
σ_{kx}	vodorovná složka napětí v libovolném bodě záběrového oblouku	[MPa]
σ_{ps}	střední přirozený přetvárný odpor materiálu	[MPa]
σ_r	napětí v radiálním směru	[MPa]
σ_{rA}	radiální napětí v bodě A	[MPa]
σ_{rB}	radiální napětí v bodě B	[MPa]
σ_{rx}	radiální napětí ve vzdálenosti x od osy y	[MPa]
σ_x	napětí v osovém směru	[MPa]
τ	smykové napětí	[MPa]
τ_k	napětí na mezi kluzu ve smyku	[MPa]
τ_{kx}	tangenciální napětí v libovolném svislém průřezu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad podélného válcování předkovku háku [14].....	9
Obr. 2 Táhlový hák [14]	10
Obr. 3 Části táhlového háku [14].....	10
Obr. 4 Šroubovka [14]	11
Obr. 5 Zjednodušené spojovací ústrojí kolejových vozidel [14].....	11
Obr. 6 Příklady výrobků společnosti MSV Metal Studénka, a.s. [14]	12
Obr. 20 Princip válcování [12]	16
Obr. 21 Schéma podélného válcování [17]	16
Obr. 22 Závislost součinitele tření na obvodové rychlosti válců [20].....	18
Obr. 23 Napětí v pásnu deformace [17]	19
Obr. 24 Průběhy napětí po záběrném oblouku [17].....	20
Obr. 25 Typy kalibrů [20].....	22
Obr. 26 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru 5 až 20 mm [20].....	23
Obr. 27 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru 20 až 100 mm [20].....	23
Obr. 28 Soustava kalibrů pro kruhovou ocel průměru až 300 mm [20].....	23
Obr. 29 Základní druhy válcovacích stolic [20]	25

SEZNAM VÝKRESŮ

- Výkres č. 1 Výkres výkovku
Název: TÁHLOVÝ HÁK
Číslo výkresu: 2016_DP_145365_01
- Výkres č. 2 Výkres zápustky
Název: ZÁPUSTKA PŮVODNÍ
Číslo výkresu: 2016_DP_145365_02
- Výkres č. 3 Výkres zápustky
Název: ZÁPUSTKA NOVÁ
Číslo výkresu: 2016_DP_145365_03

Výkresová dokumentace podléhá utajení, proto nemohla být zveřejněna v plném rozsahu.